

HR8000 로봇의 응용 설계용

프로그램 개발에 관한 연구

은 중 육  
현대중공업 로봇 개발부

박 경 독  
현대중공업 로봇 개발부

A Study on the Development of CAD Program for  
the Application Engineering of HR8000 Robot.

J. U. Eun  
Hyundai Heavy Industries Co.,Ltd

K. D. Park  
Hyundai Heavy Industries Co.,Ltd

ABSTRACT

A Computer Aided Design (CAD) program of robot application engineering has been developed for the efficient examination of HR8000 robot.

For the Simulation of robot motion, direct and inverse kinematics of robot manipulator was analyzed and robot motion was visualized.

The program could contribute to upgrade accuracy and to minimize the time for the robot application engineering.

1. 개 요

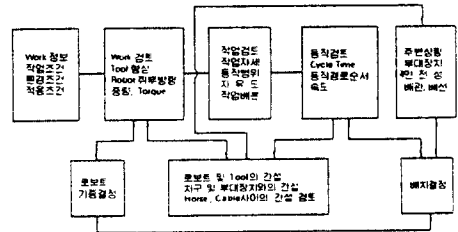
로봇을 도입하기 위해서는 주로 생산라인의 특성을 분석, 생산성 및 품질향상, 신뢰성 및 보수등의 면에서 검토하여야 하며 로봇 적용을 위한 상세 설계를 위해서는 생산라인의 과 공정, 작업물의 형상, 허용작업시간, 주변 환경조건 등을 상세히 분석, 로봇의 기종, 설치위치 및 End Effector (용접 Gun, Gripper, Torch, 핸들링용 장치등)를 선정하여야 한다.

일반적으로 기존 공장용 로봇 설치에 관한 것이 매우 협소하므로 주변 설비와의 간섭 여부를 정확히 검토하여야 하며, 스폿용접용 GUN을 사용할 경우 전압케이블, 공기 및 냉각수호스, 작업물, 지그 등에 로봇 작업시 운동에 의한 간섭 유무를 정밀히 검토하여야 한다. 이러한 로봇 적용 검토를 위해서는 3차원 공간상의 형상을 2차원상의 도면으로 표시 검토하나 특히 로봇 손목 부위가 매우 복잡하고 검토해야 할 위치가 많으므로 시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 정확성이 결여되어 경제적, 시간적으로 많은 손실을 초래하기 쉽다. 이러한 업무를 신속하고 정확하게 수행하기 위하여 본 연구에서는 현재 제작중인 HR8000형 6축 로봇에 대하여 메카니즘을 해설 로봇 응용설계용 CAD프로그램을 개

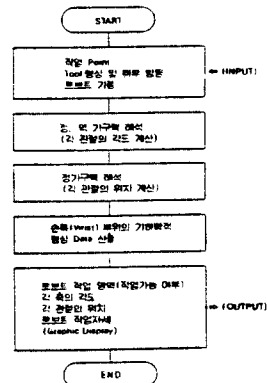
발하였다.

2. 로봇 응용 설계의 개요 및 프로그램 개발 방향

로봇을 도입한 작업공정의 자동화를 위해서는 작업물의 형상, 허용 작업 시간, 설치 공간, 작업 및 환경조건을 면밀히 분석, 로봇 기종 Tool형상, 작업 순서, 작업 자세등을 결정하여야 하며 이에 대한 Block Diagram은(그림1)에 표시된 바와 같으며, 개발된 프로그램의 유통도는(그림2)와 같다.



(그림 1) 응용 설계 Block Diagram



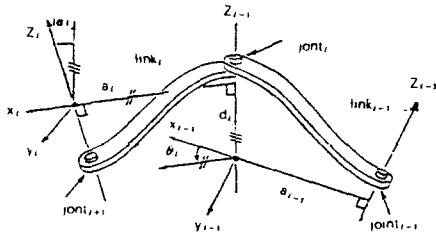
(그림 2) Flow Chart

### 3. 메카니즘 해석 및 이론 전개

#### 3.1 D-H 표기법에 의한 링크 해석

다관절형 로봇은 여러 개의 링크로 구성되어 있어서, 동작 특성을 기하학적으로 해석하는 것은 매우 복잡하다. 이를 체계적으로 해석하기 위하여 Denavit, Hartenberg는 관절로 된 체인의 각 링크에 체계적으로 좌표계를 설정하여 전체계를 해석하는 행렬 방법을 제시했다. 이것은 앞의 링크 좌표계에 관하여 다른 각 조인트의 링크 좌표계를 나타내는  $4 \times 4$  변환 행렬 (Homogeneous Transformation Matrix)로서 연속적인 변환을 통하여 로봇의 고정 좌표계에 대한 핸드 좌표계의 수학적 표현이 가능하게 되었다.

D-H 표기법에 의한 관절를 중심으로 한 관절 상호간의 링크 좌표계는 (그림3)과 같이 표기되며 링크 간의 특성은 4개의 기하학적 매개변수 즉  $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i$ 에 의해 결정된다.



(그림3) 링크 좌표계 및 매개변수

여기서 각 좌표계에 대하여  $Z_{i-1}$ 축은 관절  $i$ 의 운동 방향과 일치하고  $X_i$ 는  $Z_{i-1}$ 과 수직으로 관절  $i+1$ 로 향하도록 설정되어야 하며  $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i$ 에 대한 정의는 아래와 같다.

$\theta_i$ :  $Z_{i-1}$  축을 중심으로  $X_{i-1}$  축과  $X_i$  축 사이의 각도

$d_i$ :  $i-1$  좌표계 중심에서  $Z_{i-1}$  축 방향으로  $Z_i$  축과  $X_i$  축 교점 사이의 거리

$a_i$ :  $Z_{i-1}$  축과  $Z_i$  축의 최단 거리

$\alpha_i$ :  $X_i$  축을 중심으로  $Z_{i-1}$  축과  $Z_i$  축 사이의 각도

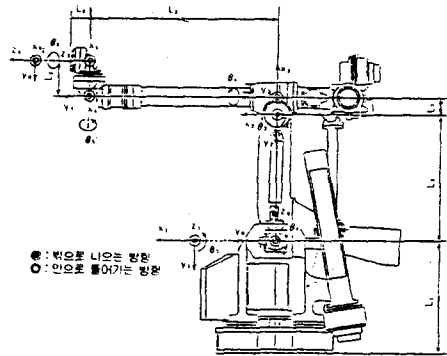
(그림3)의 각 좌표계에서 연속되는 링크  $i-1$  및 링크  $i$ 의 좌표계 사이의 상호 관계인  $4 \times 4$  변환 행렬  $A_i$ 를 구하면

$$A_i = \text{Rot}(Z_{i-1}, \theta_i) \cdot \text{Trans}(0, 0, d_i) \cdot \text{Trans}(a_i, 0, 0) \cdot \text{Rot}(X_i, \alpha_i)$$

$$\begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} C_{\alpha_i} & S_{\theta_i} C_{\alpha_i} & a_i C_{\theta_i} \\ S_{\theta_i} C_{\alpha_i} & C_{\theta_i} C_{\alpha_i} & -C_{\theta_i} S_{\alpha_i} & a_i S_{\theta_i} \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

여기서  $C_{\theta_i} \equiv \cos \theta_i$   $C_{\alpha_i} \equiv \cos \alpha_i$   
 $S_{\theta_i} \equiv \sin \theta_i$   $S_{\alpha_i} \equiv \sin \alpha_i$

HR8000 로봇에 대한 각 관절의 좌표계는 (그림4)와 같이 나타낼 수 있으며 (그림4)의 좌표계로부터 구한 각 링크의 매개변수 ( $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i$ )는 (표1)과 같다.



(그림4) HR8000 로봇의 링크 좌표계

Link	$\theta_i$	$a_i$	$d_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1 + 90^\circ$	0	0	$-90^\circ$
2	$\theta_2$	$L_2$	0	0
3	$\theta_3 - 90^\circ$	$L_3$	0	$-90^\circ$
4	$\theta_4 + 90^\circ$	0	$L_4$	$90^\circ$
5	$\theta_5$	0	$L_5$	$-90^\circ$
6	$\theta_6$	0	$L_6$	0

(표1) 각 링크의 매개변수

여기서 평행사변형 링크 구조의 특성을 고려하여 (표1)의 data를 식(1)에 적용하면  $4 \times 4$  변환행렬 ( $A_i$ )는 다음과 같다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} -S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ C_1 & 0 & -S_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & L_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & L_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} S_{3-2} & 0 & C_{3-2} & L_3 S_{3-2} \\ -C_{3-2} & 0 & S_{3-2} & -L_3 C_{3-2} \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} -S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ C_4 & 0 & S_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} C_5 & 0 & -S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & C_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

.....(2)  
 여기서  $S_i = \sin \theta_i$ ,  $C_i = \cos \theta_i$

$$\begin{pmatrix} -S_2 & -C_2 & 0 & -L_2 S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

### 3.2 HR 8000 로봇트의 기구학 해석

#### 3.2 - 1 정기구학(Direct Kinematics) 의 해석

정기구학이란 각 관절의 변수 (Joint Variable) 및 각 링크의 매개 변수가 주어진 상태에서 고정 좌표계에 대한 End Effector 의 위치 및 자세를 구하는 것을 말하며, 고정 좌표계에 대한 링크 i 좌표계의 위치와 방향을 표시하는 4x4 변환 행렬  $T_i$  는  $A_i$  행렬을 연속적으로 곱함으로써 결정된다.

즉  $T_i = A_1 A_2 \dots A_i = \prod_{j=1}^i A_j \quad i=1, 2, \dots, n$   

$$= \begin{pmatrix} X_i & Y_i & Z_i & P_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_i & P_i \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

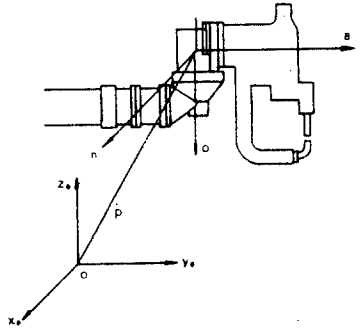


그림5) 로봇트 End Effector의 오리엔테이션

여기서  $R$ 는 회전 방향을 나타내는  $3 \times 3$  행렬이며  $P$ 는 위치 변환 벡터를 나타낸다.

HR8000 로봇트의 경우 6축으로서 고정 좌표계  $(X_0, Y_0, Z_0)$  를 포함  $(X_1, Y_1, Z_1), \dots, (X_6, Y_6, Z_6)$  의 7개의 좌표계를 가진다.

$$T_i = \begin{pmatrix} X_i & Y_i & Z_i & P_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n & o & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

여기서 벡터  $n, o, a, p$  는 (그림5)에 표시한 바와 같다.

따라서 식(2)에서 구한 행렬  $A_i$ 를 연속적으로 곱하여  $4 \times 4$  변환 행렬 ( $T_i$ ) 를 구하면

$$T_1 = A_1$$

$$T_2 = A_1 A_2 = \begin{pmatrix} -S_2 C_2 & S_1 S_2 & -C_1 & -L_2 S_1 C_2 \\ C_1 C_2 & -C_1 S_2 & -S_1 & L_1 C_1 C_2 \end{pmatrix}$$

$$T_3 = A_1 A_2 A_3 = \begin{pmatrix} -S_1 S_2 C_2 & C_1 - S_1 C_2 & -L_2 S_1 S_2 - L_2 S_1 C_2 \\ C_1 S_2 & S_1 & C_1 C_2 & L_1 C_1 S_2 + L_2 C_1 C_2 \\ C_2 & 0 & -S_2 & L_1 C_2 - L_2 S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(6)$$

$$T_4 = A_1 A_2 A_3 A_4 = \begin{pmatrix} S_1 S_2 S_4 + C_1 C_4 & -S_1 C_4 & -S_1 S_2 C_4 + C_1 S_4 \\ -C_1 S_2 S_4 + S_1 C_4 & C_1 C_4 & C_1 S_2 C_4 + S_1 S_4 \\ -C_2 S_4 & -S_2 & C_2 C_4 \\ 0 & 0 & 0 \\ -L_1 S_1 C_4 - L_2 S_1 S_4 - L_2 S_1 C_4 \\ L_1 C_1 C_4 + L_1 C_1 S_4 + L_2 C_1 C_4 \\ -L_2 S_2 + L_1 C_2 - L_2 S_2 \\ 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(7)$$

$$T_5 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 = \begin{pmatrix} (S_1 S_2 S_4 + C_1 C_4) C_5 - S_1 C_5 S_5 & S_1 S_2 C_4 - C_1 S_5 \\ (-C_1 S_2 S_4 + S_1 C_4) C_5 + C_1 C_5 S_5 & -C_1 S_2 C_4 - S_1 S_5 \\ -C_2 S_4 C_5 - S_2 S_5 & -C_2 C_5 \\ 0 & 0 \\ -(S_1 S_2 S_4 + C_1 C_4) S_5 - S_1 C_5 C_5 \\ (C_1 S_2 S_4 - S_1 C_4) S_5 + C_1 C_5 C_5 \\ C_2 S_4 S_5 - S_2 C_5 \\ 0 \\ L_1 (-S_1 S_2 C_4 + C_1 S_4) - L_2 S_1 C_4 - L_2 S_1 S_4 - L_2 S_1 C_4 \\ L_1 (C_1 S_2 C_4 + S_1 S_4) + L_1 C_1 C_4 + L_1 C_1 S_4 + L_2 C_1 C_4 \\ L_1 C_2 C_4 - L_2 S_2 + L_1 C_2 - L_2 S_2 \\ 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(8)$$

$$T_6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(9)$$

여기서

$$n_x = (S_1 S_2 S_4 + C_1 C_4) C_5 C_6 - S_1 S_2 S_5 C_6 + (S_1 S_2 C_4 - C_1 S_4) S_6$$

$$n_y = (-C_1 S_2 S_4 + S_1 C_4) C_5 C_6 + C_1 C_5 S_6 C_6 + (-C_1 S_2 C_4 - S_1 S_4) S_6$$

$$n_z = -(C_2 S_4 C_5 + S_2 S_5) C_6 - C_2 C_5 S_6$$

$$o_x = -(S_1 S_2 S_4 + C_1 C_4) C_5 S_6 + S_1 C_5 S_5 S_6 + (S_1 S_2 C_4 - C_1 S_4) C_6$$

$$o_y = (C_1 S_2 S_4 - S_1 C_4) C_5 S_6 - C_1 C_5 S_5 S_6 - (C_1 S_2 C_4 + S_1 S_4) C_6$$

$$o_z = C_5$$

$$\begin{aligned}
o_x &= (C_1 S_2 C_3 + S_2 S_3) S_4 - C_2 C_3 C_4 \\
a_x &= -(S_1 S_2 S_4 + C_1 C_3) S_5 - S_1 C_2 C_3 \\
a_y &= (C_1 S_2 S_4 - S_1 C_3) S_5 + C_1 C_2 C_3 \\
a_z &= C_2 S_2 S_5 - S_2 C_3 \\
p_x &= -L_2 (S_1 S_2 S_4 + C_1 C_3) S_5 - L_4 S_1 C_2 C_3 + L_5 (-S_1 S_2 C_4 \\
&\quad + C_1 S_4) - L_3 C_1 C_3 - L_7 S_1 S_3 - L_2 S_1 C_2 \\
p_y &= L_2 (C_1 S_2 S_4 - S_1 C_3) S_5 + L_4 C_1 C_2 C_3 + L_5 (C_1 S_2 C_4 + S_1 \\
&\quad S_4) + L_3 C_1 C_3 + L_7 C_1 S_3 + L_2 C_1 C_2 \\
p_z &= L_4 C_2 S_2 S_5 - L_4 S_2 C_3 + L_5 C_2 C_3 - L_2 S_2 + L_7 C_2 - L_1 S_1
\end{aligned}$$

따라서 각 관절의 각도( $\theta_i$ )가 주어진다면 식(5) - 식(9)로부터 고정좌표계에 대한 각 관절의 위치와 방향을 구할수 있다.

### 3.2 역기구학 (Inverse Kinematics) 의 해석

역기구학이란 고정좌표계에 대한 핸드의 위치와 방향이 주어지면, 각축의 각도( $\theta_i$ )를 결정하는 것을 말한다.

역기구학 해를 구하는 방법은  $4 \times 4$  변환 역행렬을 이용하는 방법과 기하학적인 방법, 수치 해석적인 방법이 있다.

$4 \times 4$  변환 행렬을 이용하는 방법은 식(3)에서 A의 역행렬을 연속적으로 양변에 곱(Product) 하여 얻어지며 결과식은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned}
A_1^{-1} T_1^{-1} T_2 \\
A_1^{-1} A_1^{-1} T_2^{-1} T_3 \\
A_1^{-1} A_1^{-1} A_1^{-1} T_3^{-1} T_4 \\
A_1^{-1} A_1^{-1} A_1^{-1} T_4^{-1} T_5 \\
A_1^{-1} A_1^{-1} A_1^{-1} A_1^{-1} T_5^{-1} T_6
\end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

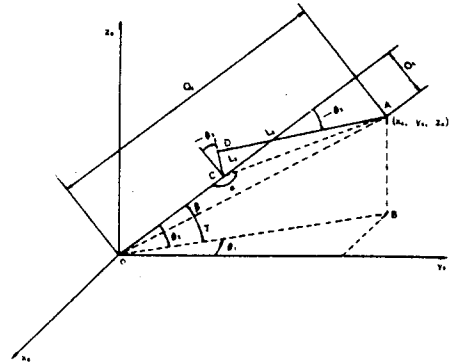
따라서 식(10)에서 양변의 요소들을 서로 비교하면 각축의 각도를 결정할수 있다. 그런데 HR8000 로봇의 경우  $4 \times 4$  변환 역행렬 방법을 사용하면  $\theta_4$  축의 오프셋링크(Offsetlink)로 인하여 각축의 각도가 서로 커플링(Coupling)된 수식화가 되어 해석적으로 정확한 해를 구할수가 없다. 그리하여 여기서는 (그림 6)에서와 같이 주어진 End Effector의 위치 및 자세에 대하여 우선 A의 좌표 ( $X_4, Y_4, Z_4$ )를 가정하여 기하학적 방법으로  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 를 구하고  $4 \times 4$  변환 역행렬을 사용하여  $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ 를 결정한다.

(그림 6)으로부터

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{-X_4}{Y_4} \right) \dots\dots\dots (11)$$

기하학적인 조건으로부터

$$\begin{aligned}
\overline{OB}^2 &= X_4^2 + Y_4^2 \\
\overline{OA}^2 &= G_1 = X_4^2 + Y_4^2 + Z_4^2
\end{aligned}$$



(그림 6) 기하학적 모델

$$\overline{AC}^2 = L_7^2 + L_3^2$$

여기서  $\overline{OA}^2 = \overline{OC}^2 + \overline{AC}^2 - 2\overline{OC} \cdot \overline{AC} \cos \alpha$

$$\begin{aligned}
G_1 = \cos \alpha &= \frac{\overline{OC}^2 + \overline{AC}^2 - \overline{OA}^2}{2\overline{OC} \cdot \overline{AC}} \\
&= \frac{L_7^2 + L_3^2 + L_2^2 - G_2}{2L_2 \sqrt{L_7^2 + L_3^2}}
\end{aligned}$$

따라서  $\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{1-G_1^2}}{G_1} \right)$

$$\theta_2 = -180^\circ + \alpha - \tan^{-1} \left( \frac{L_7}{L_3} \right) \dots\dots\dots (12)$$

마지막으로  $\cos \theta_2 = G_1 = \cos(\beta + \gamma)$

$$= \left( \frac{Q_1}{OA} \right) \left( \frac{\sqrt{X_4^2 + Y_4^2}}{OA} \right) - \left( \frac{Z_4}{OA} \right) \left( \frac{Q_2}{OA} \right) \dots\dots\dots (13)$$

여기서  $Q_1 = L_2 - L_7 \sin \theta_1 + L_3 \cos \theta_1$

$$Q_2 = -(L_2 \sin \theta_1 + L_7 \cos \theta_1)$$

따라서  $\theta_2 = \tan^{-1} (\sqrt{1-G_1^2}/G_2) \dots\dots\dots (14)$

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는  $4 \times 4$  변환 역행렬 방법으로 구하면 되나,  $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ 는 End Effector의 방향조절 링크이므로,  $3 \times 3$  회전 변환 행렬(R)만 사용해도 결정이 가능하다.

식(10)으로부터

$$A_1^{-1} A_1^{-1} A_1^{-1} T_6 = A_4 A_5 A_6 \dots\dots\dots (15)$$

$$\left[ \begin{array}{cc}
-n_x S_1 S_2 + n_y C_1 S_2 + n_z C_2 & -o_x S_1 S_2 + o_y C_1 S_2 + o_z S_2 \\
-o_x C_1 + n_y S_1 & -o_x C_1 + o_y S_1 \\
-n_x S_1 C_2 + n_y C_1 C_2 - n_z S_2 & -o_x S_1 C_2 + o_y C_1 C_2 - o_z S_2
\end{array} \right]$$

$$\left[ \begin{array}{c}
-a_x S_1 S_3 + a_y C_1 S_3 + a_z C_2 \\
-a_x C_1 + a_y S_1 \\
-a_x S_1 C_3 + a_y C_1 C_3 - a_z S_2
\end{array} \right]$$

$$= \left[ \begin{array}{ccc}
-S_4 C_3 C_5 - C_4 S_5 & S_4 C_3 C_5 - C_4 C_5 & S_4 S_5 \\
C_4 C_3 C_5 - S_4 S_5 & -C_4 C_3 C_5 - S_4 C_5 & -C_4 S_5 \\
S_4 C_3 & -S_4 S_3 & C_4
\end{array} \right] \dots\dots\dots (16)$$

식(10)으로부터  $A_1^{-1} A_1^{-1} A_1^{-1} A_1^{-1} T_6 = A_4 A_5 \dots\dots\dots (17)$

식(17)에서

$$A_1^{-1} A_2^{-1} A_3^{-1} A_4^{-1} T_0 = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (18)$$

$$\begin{aligned} f_{11} &= -n_x(S_1 S_2 S_4 - C_1 C_4) - n_y(C_1 S_2 S_4 - S_1 C_4) - n_z C_2 S_4 \\ f_{12} &= -n_x S_1 C_4 + n_y C_1 C_4 - n_z C_3 \\ f_{13} &= -n_x(S_1 S_2 C_4 + C_1 S_4) + n_y(C_1 S_2 C_4 + S_1 S_4) + n_z C_2 C_4 \\ f_{21} &= o_x(S_1 S_2 S_4 - C_1 C_4) - o_y(C_1 S_2 S_4 - S_1 C_4) - o_z C_2 S_4 \\ f_{22} &= o_x S_1 C_4 + o_y C_1 C_4 - o_z S_3 \\ f_{23} &= -o_x(S_1 S_2 C_4 + C_1 S_4) + o_y(C_1 S_2 C_4 + S_1 S_4) + o_z C_2 C_4 \\ f_{31} &= -a_x(S_1 S_2 S_4 - C_1 C_4) - a_y(C_1 S_2 S_4 - S_1 C_4) - a_z C_2 S_4 \\ f_{32} &= -a_x S_1 C_4 + a_y C_1 C_4 - a_z S_3 \\ f_{33} &= -a_x(S_1 S_2 C_4 + C_1 S_4) + a_y(C_1 S_2 C_4 + S_1 S_4) + a_z C_2 C_4 \end{aligned}$$

또한

$$A_1 A_2 = \begin{bmatrix} C_2 C_4 & -C_2 S_4 & -S_2 \\ S_2 C_4 & -S_2 S_4 & C_2 \\ -S_4 & -C_4 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (19)$$

식(16)에서 오른쪽과 왼쪽 수식을 비교하면

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left[ \frac{-a_x S_1 S_2 S_4 + a_y C_1 S_2 S_4 + a_z C_2 S_4}{a_x C_1 C_4 - a_y S_1 C_4} \right] \dots\dots\dots (20)$$

식(18)과 식(19)로부터

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left[ \frac{o_x S_1 C_4 - o_y C_1 C_4 + o_z S_2}{-n_x S_1 C_4 + n_y C_1 C_4 - n_z S_2} \right] \dots\dots\dots (21)$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left[ \frac{-a_x(S_1 S_2 S_4 - C_1 C_4) + a_y(C_1 S_2 S_4 - S_1 C_4) + a_z C_2 S_4}{a_x S_1 C_4 + a_y C_1 C_4 - a_z S_3} \right] \dots\dots\dots (22)$$

여기에서 초기에 가정된 A의 좌표(X, Y, Z)에 대하여  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_3$ 를 계산하고 이와 같이 계산된  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_3$ 에 의거, 정기구학으로 End Effector의 위치를 산출, 주어진 입력값과 비교하여 그 오차로부터 A의 좌표를 다시 수정, 동일작업을 반복적으로 수행하며 그 오차가 최소 설정치(보통 1 mm) 이하일 때 최종적인 값으로 결정한다.

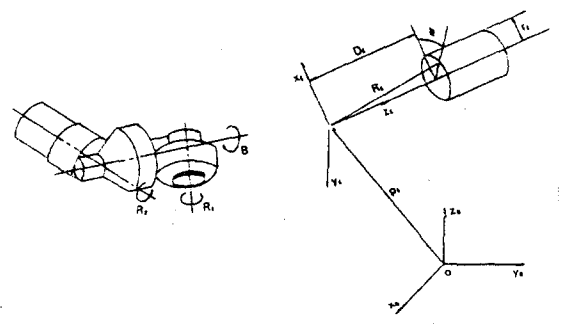
### 3.3 로봇의 공간형상에 대한 수식 정립

로봇의 공간 형상을 나타내기 위한 공간위치상의 좌표계와 손목 부위 실제 형상은 (그림7)과 같다. 로봇 암(Arm)에 대해서는 정기구학을 이용하여 골격만 나타내고, 형상이 복잡한 손목 부위 즉 R<sub>1</sub>, B, R<sub>2</sub> 축에 대해서만 수식화 하면

$$\begin{aligned} R_1 \text{ 축 } T_1' &= A_1 A_2 A_3 \text{ Trans}(R_{x1}, R_{y1}, R_{z1}) \dots\dots\dots (23) \\ B \text{ 축 } T_2' &= A_1 A_2 A_3 A_4 \text{ Trans}(R_{x2}, R_{y2}, R_{z2}) \dots\dots\dots (24) \\ R_2 \text{ 축 } T_3' &= A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 \text{ Trans}(R_{x3}, R_{y3}, R_{z3}) \dots\dots\dots (25) \end{aligned}$$

여기서

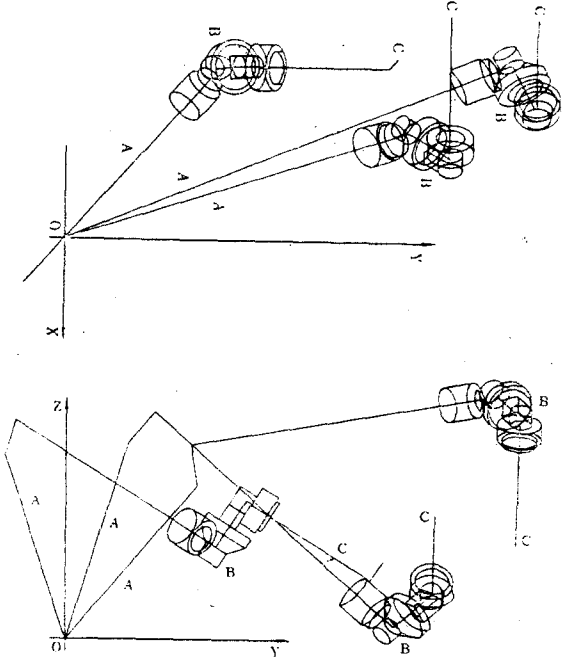
$$\begin{aligned} R_{xi} &= r_i \cos \phi \\ R_{yi} &= r_i \sin \phi & i &= 1, 2, 3 \\ R_{zi} &= D_i & 0 &\leq \phi \leq 360^\circ \end{aligned}$$



(그림 7) 로봇 손목의 실제 형상과 공간원통좌표계

## 4. 결 과

HR8000형 로봇에 대하여 기구학 해석 및 CAD 확률 위한 수식을 정립, 프로그래밍하였다. 로봇 기공, End Effector의 형상, 작업위치, 작업방법등이 입력으로 주어지면 로봇의 작업 자세 End Effector와 로봇암 사이 간섭 여부, 각 관절의 위치 및 작업가능 여부 등이 출력된다.



(그림 8) 로봇 작업자세에 대한 CAD 출력

(그림8)은 3점의 작업조건에 대해 X-Y 및 Y-Z 좌표계의 로봇 및 End Effector의 작업자세를 그래픽미닛으로 출력한 것이며 이에 대한 구체적인

입력 및 출력 데이터는 아래와 같다.

```

XXXX 8601 XXXX POINT
L1- 950.0000 L2- 1500.0000 L3- 250.0000 L5- 185.0000
GUN END POSITION IN THE R1-AXIS
0.0000 655.0000 115.0000
INPUT GUN GOAL POSITION-1010.0000 2000.0000 540.0000
INPUT DIRECTION VECTOR -0.4540 0.2000 -0.3210
INPUT PATTERN VECTOR -0.3910 0.0000 0.4540
ITERATION NO- 0 ERROR- 0.835224E 06
ITERATION NO- 1 ERROR- 0.788733E 06
ITERATION NO- 2 ERROR- 0.111518E 04
ITERATION NO- 3 ERROR- 0.828192E 01
ITERATION NO- 4 ERROR- 0.421533E-01
ANGLE OF EACH AXIS(H1,H2,H3,H4,H5,H6)
10.7033 51.9677 -50.6165 -153.4488 86.3716 100.1655
XXX ANGLE ALLOWANCE OF H-AXIS XXX 21.9677XXX
XXX ANGLE ALLOWANCE OF U-AXIS XXX 20.6165XXX
OUTPUT GUN GOAL POSITION -1010.0222 2000.2024 540.0123
OUTPUT DIRECTION VECTOR -0.4540 0.0000 -0.3210
OUTPUT PATTERN VECTOR -0.2910 0.0000 0.4540
POSITION OF HINGE -107.8940 570.3318 933.2279
POSITION OF B-AXIS -386.4018 2044.3247 968.5900
POSITION OF R1-AXIS -585.6554 2000.2012 1000.3174
XXXX 8601 XXXX POINT
L1- 950.0000 L2- 1500.0000 L3- 250.0000 L5- 185.0000
GUN END POSITION IN THE R1-AXIS
0.0000 655.0000 115.0000
INPUT GUN GOAL POSITION-1000.0000 1635.0000 540.0000
INPUT DIRECTION VECTOR -0.8190 0.0000 -0.5740
INPUT PATTERN VECTOR -0.5740 0.0000 -0.8190
ITERATION NO- 0 ERROR- 0.533047E 06
ITERATION NO- 1 ERROR- 0.763433E 05
ITERATION NO- 2 ERROR- 0.961203E 02
ITERATION NO- 3 ERROR- 0.142595E-01
ANGLE OF EACH AXIS(H1,H2,H3,H4,H5,H6)
8.4752 70.3780 -94.9985 125.2316 -97.1349 65.0612
XXX ANGLE ALLOWANCE OF H-AXIS XXX 40.3780XXX
XXX ANGLE ALLOWANCE OF U-AXIS XXX 35.3796XXX
OUTPUT GUN GOAL POSITION -1000.0284 1635.1072 539.9557
OUTPUT DIRECTION VECTOR -0.8189 -0.0000 0.5739
OUTPUT PATTERN VECTOR -0.5739 0.0001 -0.8189
POSITION OF HINGE -58.3766 391.7694 1063.0132
POSITION OF B-AXIS -553.3492 1740.5100 438.1066
POSITION OF R1-AXIS -389.4957 1635.1101 252.4640
XXXX 8601 XXXX POINT
L1- 950.0000 L2- 1500.0000 L3- 250.0000 L5- 185.0000
GUN END POSITION IN THE R1-AXIS
0.0000 655.0000 115.0000
INPUT GUN GOAL POSITION-820.0000 1415.0000 410.0000
INPUT DIRECTION VECTOR 0.2000 0.8650 -0.5000
INPUT PATTERN VECTOR -0.5000 0.4330 0.7500
ITERATION NO- 0 ERROR- 0.318812E 07
ITERATION NO- 1 ERROR- 0.155412E 07
ITERATION NO- 2 ERROR- 0.167740E 05
ITERATION NO- 3 ERROR- 0.499125E 03
ITERATION NO- 4 ERROR- 0.776205E 01
ITERATION NO- 5 ERROR- 0.106524E 00
ANGLE OF EACH AXIS(H1,H2,H3,H4,H5,H6)
35.8580 114.8528 -122.3315 128.5608 40.1496 -146.4604
XXX ANGLE ALLOWANCE OF H-AXIS XXX 20.1472XXX
XXX ANGLE ALLOWANCE OF U-AXIS XXX 27.5625XXX
OUTPUT GUN GOAL POSITION -820.2927 1415.0745 410.1237
OUTPUT DIRECTION VECTOR 0.0000 0.8650 -0.5000
OUTPUT PATTERN VECTOR -0.5000 0.4330 0.7500
POSITION OF HINGE 219.7891 -304.8837 1045.4478
POSITION OF B-AXIS -551.4125 901.2917 850.2120
POSITION OF R1-AXIS -762.3881 789.3750 658.3875
R1-AXIS -763.2535 789.2988 658.2393

```

### 5. 결 론

본 연구에서 개발한 로봇트 응용 CAD 프로그램은 로봇트의 메카니즘을 해석, 작업포인트, 작업조건 및 로봇트 기종등의 해당 데이터를 입력하면 로봇트의 작업 가능 여부, 로봇트 및 End Effector의 자세에 대한 시각적인 표시가 가능하도록 되어 있다.

따라서 본 프로그램을 이용함으로써, 로봇트 응용 설계시 필수적으로 수행되어야 할 작업점들을 정확히 계산할 수 있으며, 특히 주변 설비와의 간섭여부를 정확히 파악할 수 있게 되어 로봇트 예외의 한 공정 자동화 업무를 효과적으로 수행하게 되었다.

본 프로그램은 현재 응용설계에 필요한 가장 기본적인 것에 대해서 해석, CAD 화 되었으나 계속 앞으로 연구, 보완되어야 할 과제는 아래와 같다.

- 1) 허던 라인 알고리즘을 연구하여 로봇트 손목부를 시각적으로 3차원 형상을 창출토록 한다.
- 2) 컴퓨터 터미널상에서 로봇트 교시작업이 가능하게 하여 작업간섭 체크 및 허용작업 시간이 산출 가능토록 한다.
- 3) 로봇트의 End Effector. 특히 가장 널리 사용되는 스폿 용접 GUN 의 형상을 표준화하여 전산입력 데이터, 베이스화하여 활용한다.
- 4) 범용 CAD 프로그램과 본 프로그램을 연결시켜 최곱 응용 설계도면을 전산출력 가능토록 한다.

### REFERENCES

1. C. S. George. "Robot Arm Kinematics", IEEE Computer Society 1983.
2. Richard P. Paul and Bruce Shimano, Gordon E. Mayer. "Kinematic Control Equations For Simple Manipulator", IEEE Trans On System, Man and Cybernetics, Vol. SMC-11, No.6, June 1981, pp449~455.
3. J. Y. S. Luh and M. W. Walker, R. P. Paul. "Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulators", IEEE Trans On Automatic Control, Vol AC-25, NO.3, June 1980 pp 468~474.
4. Richard P. Paul "Robot Manipulators", MIT Press Series 1981.
5. Kunitada Yamato, "Development of Robot Simulator (ROSET)", 1985 JIRA ROBOT'89.